

Estudio experimental de la conducción del calor en el maquinado de materiales endurecidos con altas velocidades de corte.

L. Cardoso Brandão*, **R. Teixeira Coelho****, **R. Arai****

*Universidade Federal de São João del Rei - UFSJ

Praça Frei Orlando, 170 – Centro, São João del Rei – Minas Gerais

E-mail: lincoln@sc.usp.br

**Escola de Engenharia de São Carlos – USP

Av. Trabalhador São-carlense, 400 – Centro, São Carlos – São Paulo

E-mail: rtcoelho@sc.usp.br, rarai@sc.usp.br

(Recibido el 11 de Febrero de 2005, aceptado el 15 de Julio de 2005)

Resumen.

El trabajo trata del estudio teórico-experimental de la conducción del calor en los materiales endurecidos, usados para la producción de moldes y matrices, al maquinaslos con altas-velocidades del corte. Los materiales utilizados son los aceros AISI P20 y AISI D2. Los ensayos se realizaron con fresas de punta esférica (Ball Nose) con revestimiento (TiAl)N y las probetas para los ensayos tienen la forma de una $\frac{1}{4}$ parte de un tubo de 28 mm de diámetro con una longitud de 100 mm. Las pruebas realizadas demuestran la variación de la temperatura en función de los diferentes sistemas de refrigeración. Se utilizó aire comprimido y aire comprimido frío, comparándose las temperaturas de las probetas con el sistema sin refrigeración de ningún tipo. Fueron también evaluadas las deformaciones sufridas por la superficie maquinada, debido a las variaciones de temperatura teniendo en cuenta la influencia de los sistemas de refrigeración empleados.

Palabras claves: Temperatura; conducción del calor; alta velocidad de corte, moldes y matrices.

1. Introducción.

Para los sistemas de fabricación que utilizan el proceso de corte como el medio principal de producción, las nuevas técnicas, conceptos de automatización y estrategias surgen con el propósito de aumentar y mejorar el rendimiento. Para potenciar este aumento de productividad, la tecnología con alta velocidad de maquinado (HSM - High Speed Machining) o con alta velocidad de corte (HSC - High Speed Cutting) surge como una nueva herramienta o tecnología. Esto es debido al hecho de que el proceso HSM proporciona elevadas tasas de remoción de material, minimiza los tiempos improductivos, fuerzas de corte mínimas, facilita la expulsión de las virutas y la disipación del calor, lo que resulta en bajas distorsiones de la pieza aumentando la precisión de las mismas y su acabado superficial (FALLBÖHMER, 2000).

La industria de moldes y matrices produce los componentes con formatos próximos a su forma final. Muchos de estos componentes exigen que los moldes y matrices presenten formas complicadas las cuales deben ser elaboradas. La geometría complicada de esas superficies, el grado elevado de dureza de los materiales

de las matrices y la precisión dimensional exigida requieren de una avanzada tecnología para estos procesos de maquinado (ELBESTAWI, 1997). La producción rápida de moldes y matrices utilizando las técnicas HSM incorporada a las secuencias de fabricación puede reducir los tiempos de producción y costos además de la reducción de los tiempos de proyecto y de producción de los prototipos. (ALTAN, 2001).

De esta forma, con el desarrollo de investigaciones sobre la secuencia de producción de moldes y matrices, usando la tecnología HSM, se busca la disminución de los tiempos de producción, la reducción de costos, además de permitir la producción de matrices en su estado final endurecido con dureza superior a 50 HRc, minimizando la utilización del proceso de rectificación y de pulido manual comúnmente usado. Con el uso de la tecnología HSM se espera encontrar soluciones, en lo que se refiere a las herramientas, velocidades del corte y avances además de acabados superficiales y sistemas de enfriamiento que posibiliten la aplicación en la producción de moldes y matrices.

La temperatura es uno de los principales factores que influyen en el desgaste de la herramienta, y las

deformaciones en la pieza. Determinar técnicamente con precisión las temperaturas en el área de corte es muy difícil, pues existen tres fuentes principales de calor en la zona de formación de la viruta, siendo estas:

- La zona primaria de generación de calor: es el área de cizallamiento dónde la deformación plástica de la viruta es la fuente de generación de calor más grande del proceso.
- La zona secundaria de generación de calor: es la zona de interfase viruta-herramienta donde ocurre una deformación plástica adicional de las virutas generándose una considerable cantidad de calor debido a la fricción de las virutas con la superficie de salida de la herramienta.
- La zona terciaria de producción de calor: según el Jasper (1998) puede despreciarse cuando se considera una herramienta afilada, pues ocurre en la superficie de incidencia de la herramienta al estar en contacto con la pieza y cuando esta no tiene desgaste el contacto entre la pieza y la herramienta es mínimo.

Según Sales (1999), el calor generado por el cizallamiento en el interior de la zona de corte puede ser considerado beneficioso, pues este calor aumenta la temperatura en las zonas primarias y secundarias, contribuyendo a aumentar la deformación plástica. De esta manera, el calor generado en el proceso de formación de virutas es un aliado de la herramienta debido al ablandamiento de la zona de formación de la viruta reduciendo la resistencia mecánica del material, pero al mismo tiempo aumenta la temperatura de la herramienta, perjudicando su resistencia.

Adicionalmente, la temperatura caliente localmente la pieza, provocando las deformaciones indeseables y afectando su precisión dimensional.

Los conceptos de la tecnología HSM, aun no son dominados totalmente, puede decirse que debido a los altos valores de avance utilizados en el proceso de corte, el tiempo de contacto en la región de formación de la viruta es mínimo, por lo que, en el fenómeno de formación de la viruta para altas velocidades de corte los valores de deformación y el recalque del material elaborado aun son necesarios estudiarlos y comprenderlos.

Según Salomon (1931) y después Dewes (1999) la temperatura de corte alcanza un punto crítico para una velocidad intermedia dónde a partir de este punto comienza una disminución de la temperatura con el aumento de la velocidad de corte. Sin embargo no fue lo que encontró McGee (1979) el cual sugirió un incremento de la temperatura hasta el punto de fusión de la pieza elaborada no ocurriendo ninguna reducción de la temperatura con altos valores de velocidad de acuerdo con la Figura (1).

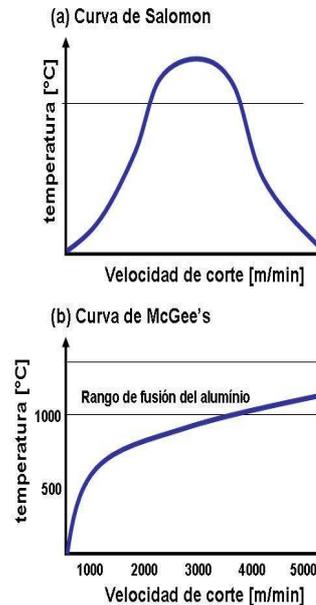


Figura 1. Curvas de Salomon y de McGee comparadas por Dewes.

Por el hecho de que la tecnología que HSM usa altos valores de avance y contacto mínimo en el área de formación de las virutas, el aumento de la temperatura en esta área no puede ser significativo para promover alteraciones dimensionales, micro y macro estructurales en la superficie elaborada. Sin embargo, Braghini Jr. (2002) encontró errores de paralelismo del orden de 60 μm en el corte del acero AISI H13 con altas velocidades de corte, demostrando que con pequeñas variaciones de temperatura la forma final de una pieza puede comprometerse con distorsiones que pueden ocurrir en el material. Es por ello que más estudios deben realizarse con el interés de verificar en que situaciones las variaciones de temperatura son significantes para provocar alteraciones dimensionales.

El objetivo de este trabajo es relacionar el aumento de la temperatura con distorsiones eventuales que pueden ocurrir en los aceros AISI P20 y AISI D2, midiendo las deformaciones y haciendo gráficos o mapas de estas variaciones a lo largo de la superficie elaborada. También se propone un estudio comparativo de estos gráficos con el objetivo de evaluar los sistemas de enfriamiento y su capacidad de eliminar calor del proceso y de corregir o provocar deformaciones en el material.

2. Materiales y métodos.

Los ensayos fueron realizados en un centro de maquinado vertical HERMLE C 800 U, de tres ejes, con una potencia del motor principal de 18 Kw. y el rango rotación de 20 a 24.000 RPM, con CNC SIEMENS

840D. La Tabla 1 presenta las condiciones de corte y las herramientas utilizadas. Las herramientas AK32G y WXX15 son de metal duro recubierta con TiAlN y la diferencia entre ellas es en la geometría y la herramienta WCB.80 es de CBN (Carbonitruro de Boro).

La Tabla 2 muestra la composición química y dureza de los materiales usados en los ensayos.

La forma del cuerpo de prueba o probeta es de $\frac{1}{4}$ de la circunferencia de un tubo de diámetro 28 mm, longitud de 100 mm y espesor de 5mm Fig. (2), montado en una mordaza especial para su fijación. En la misma figura se pueden observar, el dinamómetro y la colocación de los termopares en el cuerpo de prueba.

Tabla 1. Condiciones de maquinado y las herramientas usadas en los ensayos.

Material ensayado	Velocidad de corte [m/min]	Avance por diente	Avance [mm/min]	Rotación [rpm]	Profundidad de corte [mm]	Código de las Herramientas
Acero AISI 20	503	0,06	1.200	10.000	0,2	R216.42 16030 – AK32G 1610
Acero AISI D2	230	0,07	643	4.590	0,2	R216.42 16030 – AK32G 1610 F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15 F1827R.Z.16.Z2.08 WCB 80

Tabla 2. Característica de los materiales empleados

Característica de los materiales empleados.										
Material emplead	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ni [%]	Mo [%]	Cu [%]	Dureza [HRc]
AISI D2	1,48	0,27	0,33	0,02	0,01	11,78	0,19	0,88	0,07	57
AISI P20	0,38	0,32	0,79	0,01	0,02	1,84	0,89	0,39	0,09	30



Figura 2. Modelo del cuerpo de prueba utilizado en los ensayos.

En la parte interna del cuerpo de prueba se encuentran montados cinco termopares siguiendo una línea helicoidal sobre el arco de forma tal que el primero y el último estuvieran ubicados a seis milímetros de los extremos y los demás distribuidos de forma equidistante en toda la longitud de la línea helicoidal del arco de la circunferencia. Los termopares usados son del tipo T (Cobre-Constantan) para el rango de temperatura de -10 a 180 °C, los cuales fueron calibrados para un rango de aplicación de 10 a 90 °C. Del cuerpo de prueba la señal de los termopares pasó por un amplificador de señales y después a una placa de adquisición de datos A/D (modelo PCI - MIO - 16E - 4 - National Instruments) instalado en una computadora PC. Para la adquisición de los datos se usó el programa LabView donde el programa hizo la conversión de la señal de la entrada en voltios para grados Celsius según las curvas de calibración de cada termopar.

Se utilizó el fresado de forma ascendente y descendente ya que es una de las estrategias de corte más utilizadas pues mantiene la herramienta el mayor tiempo en contacto con la pieza, minimizando el tiempo de elaboración. Para cada material fueron realizados tres ensayos específicos siendo estos: corte en seco, con aire directo de la línea de presión del laboratorio y con el aire frío. En este último se utilizó el sistema de enfriamiento que se basa en el principio del vórtice para el enfriamiento del aire de entrada bajando la temperatura del aire de salida. En las Figura (3) y (4) se muestran los dos sistemas montados en el cabezal de la máquina.

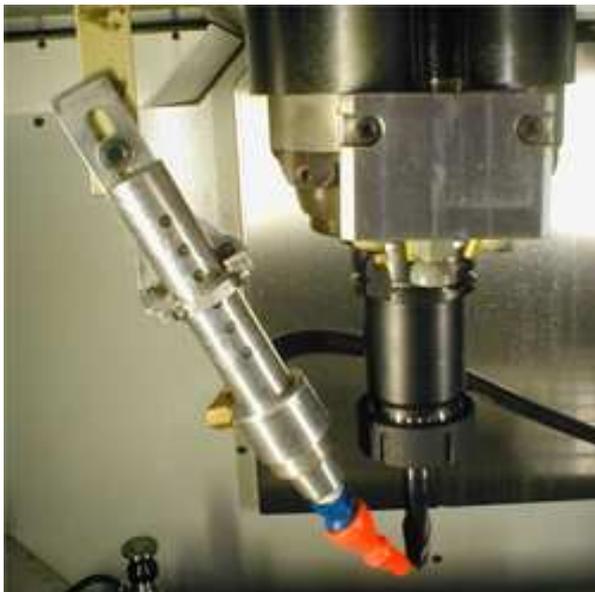


Figura 3. Sistema de enfriamiento con aire frío.

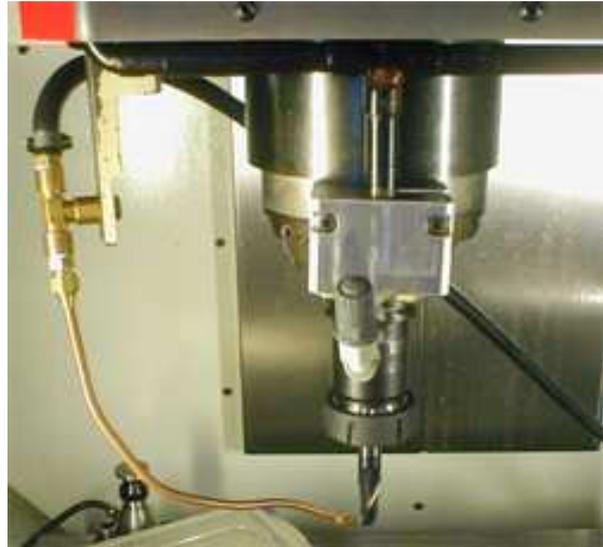


Figura 4. Sistema de enfriamiento con aire a presión convencional.

El uso de estos sistemas tenía el objetivo de evaluar la capacidad para eliminar calor del proceso de corte y provocar el enfriamiento de la pieza tanto para el sistema de aire comprimido convencional, como también para el sistema de aire frío. Los valores de la presión y del caudal usados en los ensayos se presentan en la Tabla. (3). Inicialmente se realizaron los ensayos en seco y después, con los otros dos sistemas de enfriamiento de forma alternativa comparándose las curvas de temperatura para cada uno de los ensayos. Fueron realizados 12 ensayos con replicas para cada una de las condiciones de enfriamiento.

Tabla 3. Valores de temperatura, presión y caudal para las pruebas de fresado.

Prueba	Temp. media [°C]	Caudal [m ³ /h]	Presión en la entrada del sistema de enfriamiento [bar]
Seco	24	0	0
Aire comprim.	10	22	6
Aire frío	- 4	22	6

Para la medición de los cuerpos de prueba se usó el sistema de posicionamiento automático de la máquina. Fueron distribuidos cinco perfiles longitudinales a lo largo del eje de la pieza y distribuidos a igual distancia con veinte puntos de medición en cada perfil. Se posicionaron el primero y el último punto a 1 mm de los extremos y los otros distribuidos de una manera equidistante. De esa manera, fue posible obtener los perfiles a lo largo de la longitud de la pieza y obtener una referencia con respecto a las variaciones dimensionales finales de forma de la pieza.

3. Análisis de los resultados.

Los gráficos de las Figuras (5) y (6) muestran el comportamiento de la temperatura durante el maquinado del cuerpo de prueba de acero AISI D2. El comportamiento de la temperatura fue similar para el acero AISI P20, presentando una variación de temperatura pequeña en función de la diferencia de dureza de los dos materiales. LA Figura (7) muestra el gráfico resumido del gradiente (ΔT) de la temperatura máxima alcanzada en cada termopar para las tres herramientas usadas en el maquinado del acero AISI D2 con los tres sistemas de refrigeración. Se observa un aumento de las temperaturas en el maquinado en seco para todas las herramientas usadas. Los valores de temperatura encontrados en los ensayos en seco demuestran que una buena parte del calor generado en el proceso aun se transfiere para el material elaborado elevando considerablemente la temperatura de la pieza Figura (5).

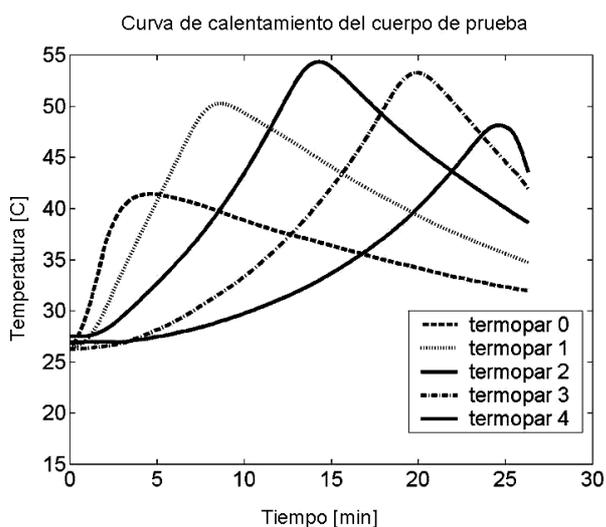


Figura 5 – Curvas de calentamiento para el Acero AISI D2 ensayo en seco (R216.42 16030 – AK32G 1610).

Los dos sistemas alternativos de refrigeración de la pieza se muestran eficientes eliminando calor de la misma. El sistema donde se aplico el enfriamiento con aire comprimido, directamente de la línea del laboratorio, consiguió mantener la temperatura de la pieza próxima a la temperatura ambiente, y el sistema de aire frío consiguió disminuir la temperatura de los termopares posicionados en las extremidades de la pieza, Figura (6), mostrándose no sólo eficaz al eliminar el calor introducido durante el proceso, sino también para proporcionar una disminución de la temperatura en la pieza.

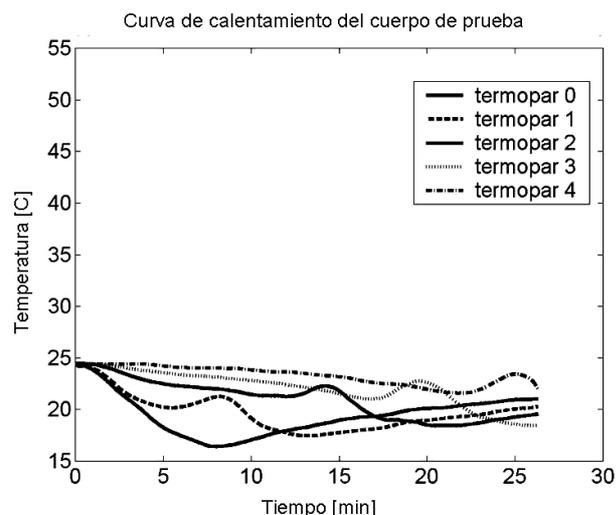


Figura 6 – Curvas de calentamiento para el Acero AISI D2 ensayo con aire frío (R216.42 16030 – AK32G 1610).

En ambos ensayos se nota un incremento mayor de la temperatura para los termopares que fueron colocados en la zona central del cuerpo de prueba. Esto es debido a la acumulación del calor a lo largo del maquinado lo cual es registrado simultáneamente por los termopares posterior al movimiento de la herramienta. Además, el primero y el quinto termopar estaban montados cerca de los extremos intercambiando fácilmente el calor con la mordaza y con el ambiente. Este hecho es perceptible y se repite en los dos materiales y con las tres herramientas usadas. Los valores de temperatura encontrados para la herramienta de CBN (F1827R.Z.16.Z2.08 WCB80) presentaron la misma conducta que los ensayos con las otras herramientas no presentando grandes variaciones de temperatura, demostrando que la herramienta con aproximadamente 80% de CBN en la composición (WCB80) no era capaz ayudar en la retirada de calor en esta operación.

La Figura (8) presenta perfil del maquinado en seco del acero AISI D2, y la Figura (9) y (10) muestran los perfiles con el aire comprimido y el aire frío, respectivamente. Para el maquinado en seco se observa una cierta distorsión de la superficie maquinada, verificándose a través de los cinco perfiles medidos a lo largo de la pieza. En los primeros tres perfiles en la Figura (8) no ocurrió una deformación considerable, sin embargo en los últimos dos perfiles se nota una deformación cóncava de a hasta 12 mm. Esa deformación se atribuye a la dilatación resultante del calentamiento mayor en la parte central del cuerpo de pruebas además de ser este espacio dónde la velocidad de corte era más elevada. Para el perfil donde se utiliza el sistema de enfriamiento con el aire comprimido, Figura (9), la deformación cóncava esta bien localizada en la parte central del cuerpo de prueba.

Esto demuestra que el sistema era eficaz eliminando el calor en la parte inferior del cuerpo de prueba donde la velocidad de corte era elevada provocando deformaciones de aproximadamente 25 μm.

Para el sistema de refrigeración con el aire frío Figura (10) ocurre el resultado opuesto a lo que ocurrió para el maquinado en seco. Se nota una deformación convexa

para los tres últimos perfiles, alcanzando cerca de 30 μm, hecho este que es debido a una contracción de la pieza por la disminución de la temperatura. Para el maquinado del acero AISI P20, ocurren hechos similares, con la diferencia de que los valores de las distorsiones son mayores que los encontrados para el acero AISI D2.

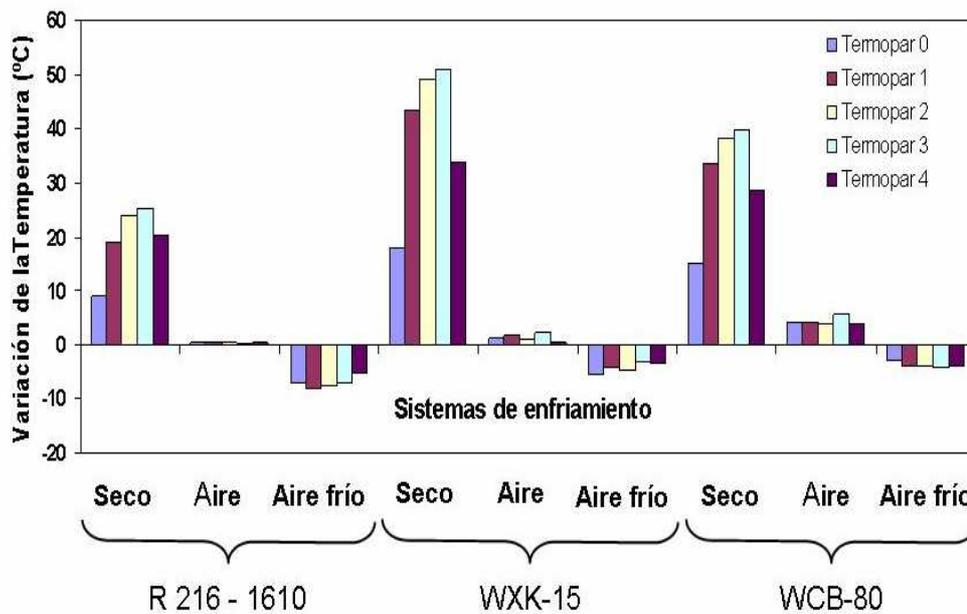


Figura 7 - Gráfico del comportamiento de las temperaturas en función de los sistemas de enfriamiento y para las tres herramientas usadas en el maquinado del acero AISI D2.

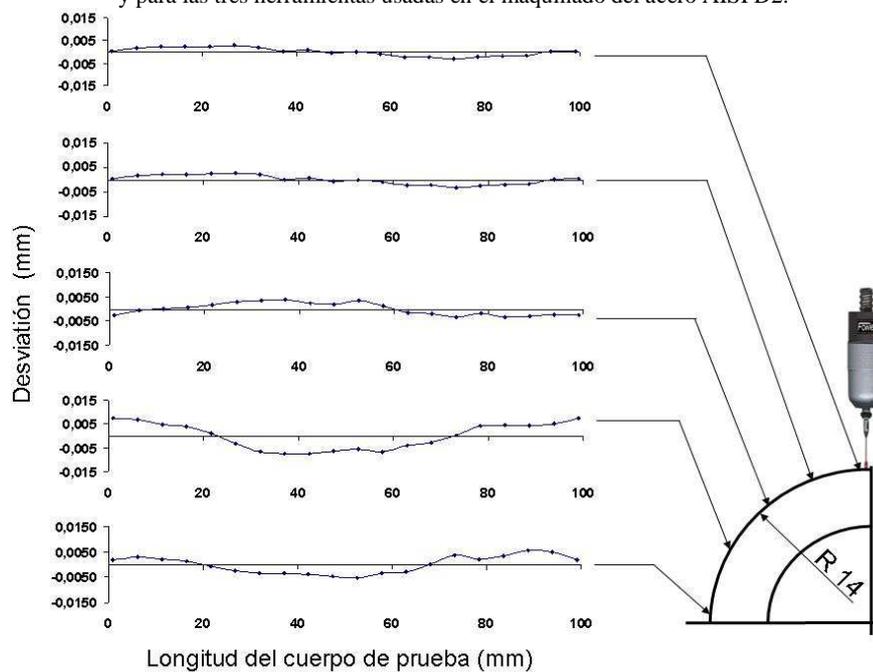


Figura 8 - Gráfico del perfil del cuerpo de prueba después del ensayo de maquinado del acero AISI D2 en seco (F1827R.Z.16.Z2.08 WXK15)

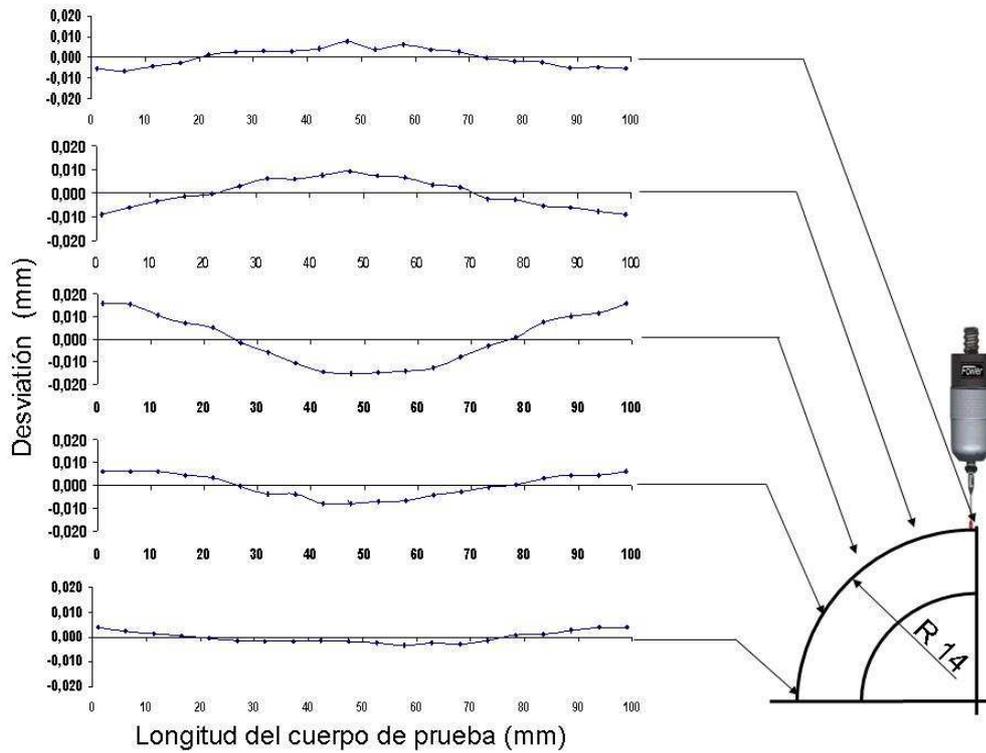


Figura 9 - Gráfico del perfil del cuerpo de prueba después del ensayo de maquinado del acero AISI D2 con aire comprimido (F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15)

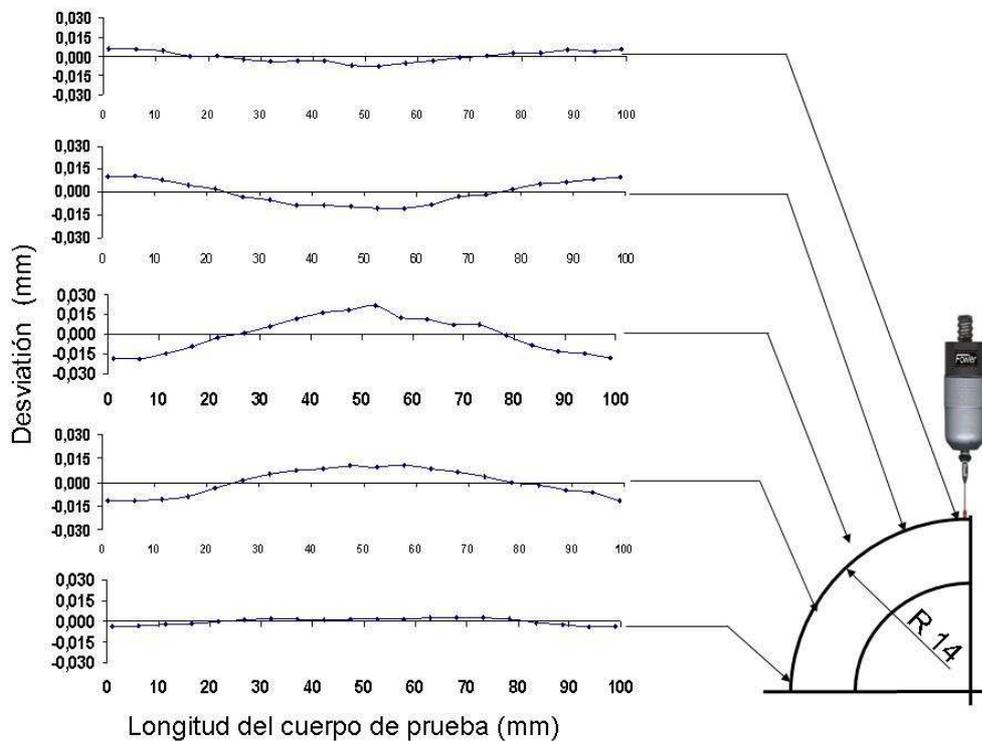


Figura 10 - Gráfico del perfil del cuerpo de prueba después del ensayo de maquinado del acero AISI D2 con aire frío (F1827R.Z.16.Z2.08 WXX15)

4. Conclusiones.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el maquinado de los aceros AISI D2 y P20 con altas velocidades del corte, se pueden dar las siguientes conclusiones:

1. Existe un aumento de temperatura en las piezas de acero endurecido al fresarlas con altas-velocidades de corte el cual debe ser tenido en cuenta. Bajo las condiciones de ensayo hubo un aumento de aproximadamente 27,16°C en el acero AISI D2 fresado en seco con WC y una disminución aproximadamente 7,83 °C cuando se aplicó el enfriamiento con el aire frío a -4 grados °C. Para el acero AISI P20 los valores eran 13,91°C y 5,15°C bajo las mismas condiciones. Usándose CBN los valores fueron de 25,39 °C y 8,27 °C, respectivamente.
2. Los dos sistemas de enfriamiento utilizados para el maquinado, alternativos a los fluidos de uso tradicional, se mostraron eficaces para el enfriamiento de los cuerpos de prueba, permitiendo reducir la temperatura de la pieza satisfactoriamente.
3. El enfriamiento con el aire frío se presenta como una buena alternativa para el futuro que podrá usarse en los procesos donde se esperan aumentos significativos de temperatura y deformaciones mayores en el maquinado de las piezas y desgaste de la herramientas.
4. Las deformaciones encontradas en los cuerpos de prueba muestran que las pequeñas variaciones geométricas incluso pueden ocurrir también en los procesos de maquinado con altas velocidades de corte donde no es considerado el calor como el factor de influencia determinante.
5. La medición de la topografía de la superficie maquinada mostró que los diferentes sistemas de enfriamiento permitieron distorsiones de 30µm en el acero AISI D2 y de 85µm en el acero AISI P20. En las superficies maquinadas sin enfriamiento (en seco) y con el aire comprimido la superficie se mostró de una manera cóncava, mientras las obtenidas con el aire frío la deformación fue convexa.

Agradecimientos.

Los autores le agradecen a CAPES y FAPESP por el apoyo financiero, SANDVIK y Gerdau Açominas S.A. – Aços Finos Piratini por el suministro del herramienta y de las muestras de acero herramienta respectivamente.

5. Bibliografía.

1. Altan, T. et al. (2001). "Manufacturing of dies and molds". *Annals of the CIRP, Paris*, v.46, n.1, p.57-62.
2. Braghini Jr., A. (2002). "Metodologia para escolha de fluidos de corte não agressivos ao meio ambiente para aplicações em usinagem dos metais". 230p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.
3. Dewes, R.C. et al. (1999). "Temperature measurement when high speed machining hardened mold/die steel". *Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam*, v.92/93, p.293-301, Aug.
4. Elbestawi, M.A. et al. (1997). "High speed milling of dies and molds in their hardened state". *Annals of the CIRP, Paris*, v.46, n.1, p.57-62.
5. Fallböhmer, P. et al. (2000). "High speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing". *Journal of Materials Processing Technology, Amsterdam*, v.98, n.1, p.104-115, Jan.
6. Jaspers, S. P. F. C.; Dautzenberg, J. H.; Taminau, D. A. (1998). "Temperature measurement in orthogonal metal cutting". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.14, n.1, p.7-12, July-Sep.
7. McGee, F.J. (1979). High Speed machining – study: methods for aluminium workpieces, *American Machinist*, p.121-126.
8. Sales, W.F. et al. (1999). Nem sempre o fluido com maior poder de refrigerante garante temperaturas de corte mais baixas. *Máquinas e Metais, São Paulo*, ano 36, n.407, p.46-61, dez.

Experimental study of heat conduction in mechanization with high cutting speeds of hardened materials.

Abstract.

This paper deals with the theoretical-experimental study of heat conduction in hardened materials for the production of molds and dies using high speed cutting. The employed materials were the AISI P20 and AISI D2 steels, being the tests carried out with (TiAl)N coated ball nose in a work piece with the shape of a 1/4 tube with 28 mm diameter and 100 mm length. This investigation demonstrates the variation of temperature as a function of different cooling systems, that is, compressed air and compressed cold air. Possible geometric deformation of the machined surfaces due to these variations in temperature for distinct cooling systems was also evaluated.

Keywords: Temperature, heat exchange; high cutting speed, dies.